

액화천연가스 용기의 자연 기화량에 관한 연구

조영도, 장성동, 김지윤
한국가스안전공사 가스안전시험연구원

A Study on the Natural Evaporation Capacity of LPG Container

Young-Do Jo, Sung-Dong Chang and Ji-Yoon Kim
Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation,

1. 서론

LP가스 유통구조 개선과 안전성향상을 위하여 기존의 중량거래형식을 체적거래 형식으로 전환토록 '97. 2. 14일 액화석유가스의안전및사업관리법 시행규칙이 개정되었다. 기존의 공동주택은 2001년 12월까지, 단독주택에는 2003년 12월까지 체적거래를 하여야 함에 있어서 부실시공을 방지하기 위하여 가스소비량에 따른 적절한 설치 용기수 결정이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 LP가스 용기의 가스발생능력을 산정하여 체적거래 시설에 따른 용기의 설치수를 결정하고, 용기 교체시 발생하는 LP가스 잔량을 예측하기 위하여 LP가스의 물성 등 기화능력에 영향을 주는 여러 가지 인자에 대한 분석하고자 한다.

2. 지배방정식

용기내부의 LP가스액을 기준으로 외부에서 열유입과 가스 유출에 의한 열손실을 고려하여 에너지 수지를 아래식과 같이 간단하게 나타낼 수 있으며, 이식을 이용하여 LP가스 액상의 온도변화를 구할 수 있다.

$$mc \frac{d\theta}{dt} = qA(\theta_o - \theta) - \lambda G \quad (1)$$

위 식에서 전열면적은 LP가스 액체의 위치가 용기의 밑 경부 보다 높은 경우와 낮은 경우에 대한 근사식은 아래와 같다.

- 액면이 경부보다 높은 경우

$$A = n \left(\frac{4m/n}{\rho D} - \frac{4V_{mi}}{D} + A_{mi} \right) \quad (2)$$

- 액면이 경부보다 낮은 경우

$$A = n \left(\frac{am/n}{\rho} + b \sqrt{\frac{m/n}{\rho}} \right) \quad (3)$$

여기서 m은 잔액량(kg), n은 설치용기의 본수 그리고 LP가스 용기의 형상에 대한 각 변수들은 표 1과 같다.

표 1. LP가스 용기종류에 따른 열전달면적 계산에 사용되는 상수

용기(kg)	직경 D(m)	경부의 면적 A _{mi} (m ²)	경부의 부피 V _{mi} (m ³)	a	b
50	0.3593	0.1399	0.006072	-3.938	2.088
20	0.313	0.1062	0.004014	-4.564	1.951
10	0.294	0.0937	0.003326	-4.850	1.890

LP가스의 주성분이 프로판과 부탄이므로 이에 대한 프로판과 부탄의 밀도, 정압하에서 비열 그리고 증발잠열은 아래 식으로 예측할 수 있다.

- 밀도

$$\rho_p = 1000(0.5303 - 0.001385 \times \theta - 4.262 \times 10^{-6} \times \theta^2) \quad (4)$$

$$\rho_b = 1000(0.6039 - 9.4304 \times 10^{-4} \times \theta - 2.828 \times 10^{-6} \times \theta^2) \quad (5)$$

- 정압하에서 비열

$$c_p = 0.6582 + 0.0019131 \times \theta + 1.08696 \times 10^{-5} \times \theta^2 \quad (6)$$

$$c_b = 0.5730 + 0.0012265 \times \theta + 4.5113 \times 10^{-6} \times \theta^2 \quad (7)$$

- 증발잠열

$$\lambda_p = 89.256 - 0.3593 \times \theta - 0.0010413 \times \theta^2 \quad (8)$$

$$\lambda_b = 93.067 - 0.2579 \times \theta - 3.5138 \times 10^{-4} \times \theta^2 \quad (9)$$

LP가스 액체의 조성은 초기 농도와 잔액정도에 따라 계속 변하게 된다. 즉 초기 LP가스 액체의 조성은 대부분 90% 이상이 프로판이지만, 용기 교환시 남아 있는 LP가스에는 대부분 부탄의 조성이 높다. 따라서 프로판을 100%로 가정하여 자연기화량 예측 및 잔량을 계산하게 되면, 실제 상황과는 차이가 발생하게 된다. 특히 LP가스를 반복하여 충전하게되면 부탄의 농도가 계속 증가하게 됨으로 자연기화량 계산에서 부탄을 고려하지 않을 수 없다.

프로판과 부탄의 2성분으로 구성된 LP가스의 프로판 물질수지로부터 잔량변화에 따른 조성변화는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{dL} = \frac{y-x}{L} \quad (10)$$

위 식에서 프로판의 액체조성(x)과 기체조성(y) 간의 평형관계식은 다음과 같다.

$$y = \frac{xP_p}{xP_p + (1-x)P_b} \quad (11)$$

프로판과 부탄의 증기압(P_p, P_b)을 온도에 따른 Antoine 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_p = e^{9.16205 + \frac{-1896.04}{\theta + 249.026}} \quad (12)$$

$$P_b = e^{9.07356 + \frac{-2169.97}{\theta + 239.659}} \quad (13)$$

체적저래 시설에서 배관의 마찰을 무시하고 압력조정기의 특성을 고려하여 압력과 가스공급유량 변화를 고려하면 다음과 같다. 자동절체식 조정기를 사용할 경우 2단 감압식으로 용기의 압력과 관계 없이 거의 일정한 유량이 흐르지만, 수동절체기를 사용할 경우 일단 감압식 조정기의 특성에 의하여 압력조정범위에서는 다음식과 같이 용기내부 압력 변화에 따라 유량변화를 나타낼 수 있지만,

$$Q = Q_o + sPQ_o \quad (14)$$

압력조절 불가능한 범위 ($\leq 0.7 \text{ kgf/cm}^2$)에서는 아래식과 같이 표현된다.

$$Q = k\sqrt{P} \quad (15)$$

가스공급 유량과 용기내의 가스물성 변화를 식(1)에서 식(15)까지 전산모사를 통하여 해석할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

지배방정식의 수치해석에서 시간간격을 가스를 많이 사용하는 피크시는 1분으로 하고, 피크시 이외의 사용에 대하여서는 5분으로 하여 시뮬레이션을 행하였다.

20 kg용기에 가스를 충전하여 16°C, 습도 78%의 대기에 30분 이상 방치한 후, 용기밸브를 완전히 개방하고 조정기를 통해 가스를 방출시키면, 약 30분 경과 후에 용기의 표면에 결빙이 일어나기 시작하였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 방출속도는 약 40분 경과 후 급격히 감소하여 1시간 후 거의 일정하였다. 이때 용기의 내부압력은 거의 0 이었다. 총괄열전달계수의 변화에 따라 가스방출속도

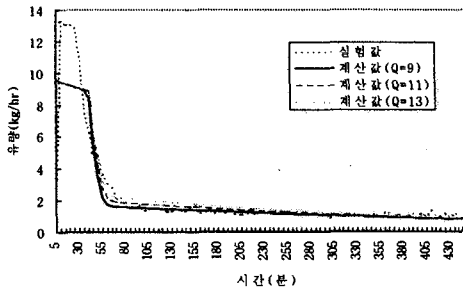


그림 1. LP가스 용기의 총괄열전달계수 변화에 따른 가스 방출량

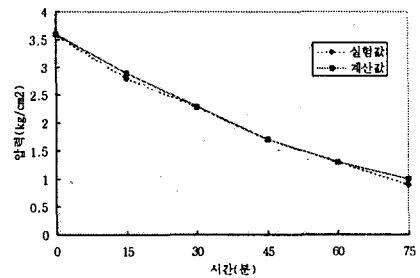


그림 2. 시간에 따른 LP가스 용기의 내부압력변화(가스 소비량 2.3 kg/hr)

변화는 크지 않지만, 총괄열전달계수를 $9\sim 13 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{C}^\circ$ 으로 하는 경우 계산치와 실험치가 거의 일치하였다. 그러나 결빙현상에 의하여 유량에 대한 계산 결과가 실험치보다 약간 낮게 나타났다.

수증기의 응축과 결빙에 의한 현상을 배제하기 위하여 습도를 거의 제거한 상태의 0°C 에서 남아있는 LPG량이 14 kg이고, 가스 소비량이 2.34 kg/hr의 일정한 속도로 하였을 때의 실험한 결과와 계산치를 그림 2에 나타내었다. 압력조정기의 특성에서 비례상수 s 를 0.014로 하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 용기표면에 수증기가 응축이 되어 결빙현상이 일어나지 않을 경우, 시뮬레이션 결과가 실험치와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

따라서 본 시뮬레이션은 수증기가 용기표면에 응축되고 결빙이 일어나는 조건에서는 가스발생량 및 용기내부 압력은 실험치보다 약간 낮게 계산되고, 수증기가 응축되지 않으면 실험치와 계산치가 거의 일치하였다. 그리고 일반적으로 LP가스 용기의 자연기화능력을 이용한 가스공급 시스템에서 수증기 응축 및 결빙현상은 정상적인 공급상태에서는 거의 일어나지 않는다.

그림 3은 설정유량을 10 kg/hr로 하였을 때 외부온도 변화가 시간에 따른 유량변화에 미치는 영향을 나타내었다. 앞서도 언급하였듯이 단단식 조정기는 조정기 전단 압력 변화에 의하여 약간의 유량변화가 있다. 외부온도가 10°C 인 경우 100분, 20°C 인 경우 130분, 30°C 인 경우 155분에서 유량감소가 급격히 일어난다. 그림 4에 나타낸 시간에 따른 압력변화 곡선에서 용기내부의 압력이 조정기의 압력조정 하한계인 0.7 kg/cm^2 에서 유량변화가 급격히 일어남을 알 수 있다. 시간이 어느 정도 경과하게 되면 시간에 따라 거의 특성치가 변하지 않는 정상상태에 도달하게 되며, 정상상태에서 용기내부의 압력은 거의 0이고, 액화석유가스의 온도는 약 -40°C 이다.

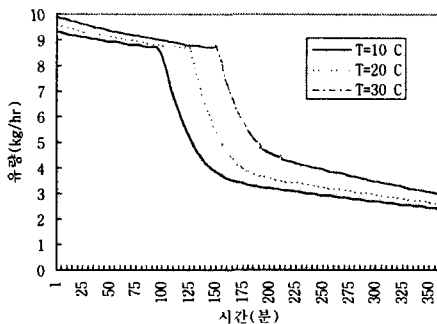


그림 3. 외부온도 변화에 따른 가스유량 변화(설정유량 : 10 kg/hr, LP가스 조성 : 0.95, 50kg 용기)

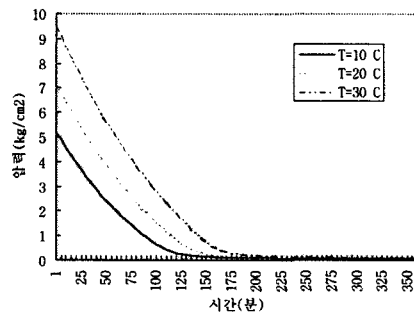


그림 4. 외부온도 변화에 따른 용기의 내부압력변화(설정유량 : 10 kg/hr, LP가스 조성 : 0.95, 50kg 용기)

그림 5, 6에서 충전시 프로판의 조성이 높을수록 유량이 급격히 감소하는 시간은 길어지고, 정상상태에서 유량은 조성에 따라 약간 증가하고, 용기내 LP가스

의 온도는 감소하였다. 또한 프로판의 조성이 낮을수록 최소도달온도는 높고, 최소온도에 도달 후 시간에 따라 서서히 증가하는 온도의 기울기가 큰 것을 알 수 있었다. 시간에 따른 온도가 증가하는 것은 부탄의 농도가 계속 증가하기 때문으로 사료된다.

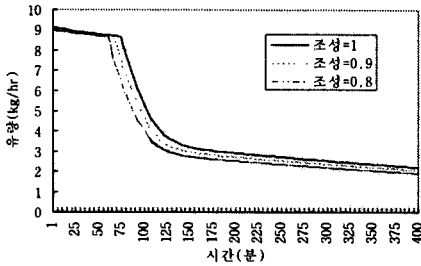


그림 5. 충전시 프로판의 조성변화에 따른 가스유량변화(설정유량 : 10 kg/hr, LP가스 외부온도 : 0°C, 50kg 용기)

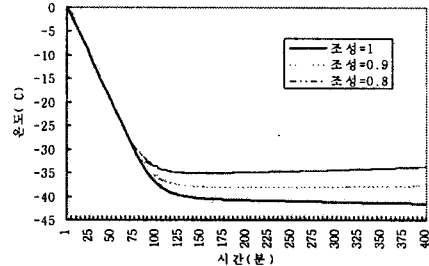


그림 6. 충전시 프로판의 조성 변화에 따른 용기의 내부온도변화(그림 5와 조건이 같음)

용기 1개당 가스발생능력은 외부온도, 충전시 프로판조성, 피크시 연속사용시간에 크게 영향을 받는다. 표 2에 용기 1개당 가스발생능력을 나타내었다. 가스발생능력은 온도와 프로판 분율이 낮을수록 감소한다. 그리고 가스발생능력은 자동절체기를 사용할 경우 수동절체기 사용에 비하여 항상 높으며, 차이는 프로판조성과 온도가 높을수록 크다.

표 2. 용기 1개당 가스발생능력(kg/hr)(연속사용 피크시간 : 1시간)

외기 온도 (°C)	가스조성 (프로판%)	수동절체기 사용			자동절체기 사용		
		50kg용기	20kg용기	10kg용기	50kg용기	20kg용기	10kg용기
5	95	5.4	2.2	1.2	7.4	3.0	1.6
	90	4.8	1.9	1.1	6.2	2.9	1.5
	80	3.5	1.4	0.8	4.9	2.3	1.2
0	95	4.3	1.9	1.0	5.7	2.3	1.2
	90	3.8	1.6	0.9	4.9	2.0	1.1
	80	2.4	1.0	0.6	3.9	1.6	0.8
-5	95	3.3	1.4	0.8	4.1	1.8	0.9
	90	2.8	1.2	0.7	3.5	1.6	0.8
	80	1.7	0.7	0.4	2.5	1.1	0.5
-10	95	2.5	1.1	0.6	3.0	1.2	0.7
	90	2.0	0.9	0.5	2.5	1.0	0.5
	80	0.9	0.4	0.2	1.4	0.6	0.3
-15	95	1.7	0.7	0.4	1.8	0.8	0.4
	90	1.2	0.5	0.3	1.3	0.6	0.3
	80	0.2	-	-	0.4	0.2	-

- : 가스발생능력이 0.1 kg/hr 이하

※ 소비시간이 1시간보다 긴 경우 가스발생능력은 위 표 보다 적음.

4. 결 론

본 연구에서는 액화석유가스의 물성 예측식들을 이용하여 자연기화량능력, 용기의 온도, 용기내부 압력 등을 시뮬레이션으로 살펴본 결과는 다음과 같다.

용기표면으로부터 액화석유가스로 전달되는 총괄 열전달계수는 실험결과와 비교하여 약 $9\sim 13 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 임을 알 수 있었다. 액화석유가스 용기내부의 압력이 압력조정기의 압력조정 하한계에 도달하였을 때 가스방출 유량은 공기로부터 전달되는 열량과 균형을 이루는 일정한 값으로 급격하게 감소하였고, 대기 온도의 증가에 따라 가스 방출유량이 급격히 일정한 값으로 감소하는 시점이 길어지며, 일정한 시간동안 용기 한 개당 가스발생능력이 증가하였다. 또한 용기에 가스 충전시 프로판의 농도가 증가할수록 용기 한 개당 가스발생능력은 증가하고 용기 교체시 남아있는 액화석유가스의 양이 감소하였다.

참 고 문 헌

1. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E.; "The Properties of Gases and Liquids", 4th ed., McGraw-Hill, pp29-73, 1986
2. Spencer, C. F., and Danner, R. P.; J. Chem. Eng. Data, 17: p.236, 1972
3. Hankinson, R. W., and Tomsom, G. H., AIChE J., 25, p.653, 1979
4. Ambrose, D.: "Vapor-Pressure Eqations," Natl. Phys. Lab. Rep. Chem., November, p.19, 1972
5. Pitzer, K. S., Lippmann, D. Z., Curl, R. F., Huggins, C. M., and Petersen, D. E., J. Am. Chem. Soc., 77, p.3433, 1955
6. Lee, B. I., and Kesler, M. G., AIChE J. 21, p.510, 1975
7. 高壓ガス保安協會 液化石油ガス研究所, "液化石油ガス研究所 論文集", p.486, 1995
8. 한국가스안전공사, "가스 방출 실험 보고서", 1996
9. 日本LPガス協會, "LPガス技術總覽", 技報堂出版株式會社, pp34-36, 1981